

## 현장부설시험을 통한 철도 강화노반공법의 적용성에 관한 연구

### A Study on the Applicability of the Reinforced Railroad Roadbed Method by Field Test

황선근<sup>1)</sup>\*, Seon-Keun Hwang, 신민호<sup>2)</sup>, Min-Ho Shin, 이성혁<sup>3)</sup>, Seong-Hyeog Lee, 최찬용<sup>4)</sup>, Chan-Yong Choi, 이시한<sup>4)</sup>, Si-Han Lee,

- 1) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀장, Research Manager, KRRI.
- 2) 한국철도기술연구원 시설전기연구본부장, Director General, KRRI.
- 2) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀 선임 연구원, Senior Researcher, KRRI.
- 3) 한국철도기술연구원 철도노반방재연구팀 연구원, Researcher, KRRI.

**SYNOPSIS** : The reinforced roadbed should have the ability to spread out the load intensity lower than the bearing capacity of the subgrade of track structure as well as to prevent the softening of roadbed by providing appropriate stiffness in the roadbed, thus fully supports the track structures.

Full scale reinforced roadbeds with several different types of monitoring sensors was also constructed to evaluate the performance of each reinforced roadbed through the continuous monitoring while the train operation.

In this study, Field tests such as PLT, SASW were also carried out at each reinforced roadbed. The results of the field and lab tests, installation and calibration of sensors, as well as construction condition of the reinforced roadbed are presented.

**Keywords** : reinforced roadbed, Field test, PLT, SASW

#### 1. 서론

최근 우리 사회는 급격한 경제, 사회의 발전에 따라 교통 및 물류량의 이동이 증대되어 기존의 운송체계의 한계를 드러내고 있으며 이러한 운송체계의 확충과 신설이 국가적인 주요 사업의 하나로 부각되고 있다. 일반적으로 흙노반 궤도구조에 있어서 도상 발라스트가 노반에 관입됨에 따른 선로의 침하나 노반자체의 연약화에 따른 압축침하 및 도상 발라스트로 향한 이토화된 노반흙이 분출되어 궤도보수에 상당한 노력을 기울이고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 선진외국에서는 강화노반을 채택하여 이러한 문제점을 해결하려고 하고 있다. 강화노반은 궤도를 충분히 견고하게 지지함과 동시에 궤도에 대하여 적절한 탄성을 부여하여 상부노반의 연약화를 방지하며 또한 상부노반의 내압강도 이하로 하중을 분산, 전달하는 기능을 가진다. 이러한 기능의 회복 또는 강화를 위하여 본 연구에서는 철도 선진국에서 채택하고 있는 강화노반에 대한 성능평가를 위하여 실현장 부설시험을 추진하였다.

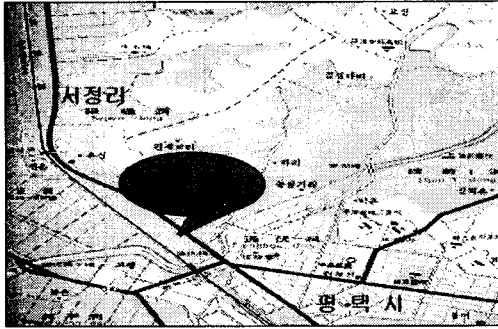
본 강화노반 실현장부설시험구간은 서울기점 70k700~70k850(L=150m)구간에 흙, 수경성 입도조정 고로슬래그(HMS-25), 입도조정쇄석(M-40) 등 강화노반 재료별로 9개 단면을 조성하여 실 열차운행시의 노반의 거동을 계측하기 위해 침하계, 토압계, 속도계등의 계측기를 매설하였다.

추후 실열차가 운행하게 되면 장기 계측을 실시하여 결과를 보고하기로 하고 여기에서는 강화노반 현장 부설이 완료되기까지의 실내·외 물성시험, 계측기의 매설 및 검증 과정, 강화노반 재료별, 두께별 시공상황에 대하여 기술하였다.

## 2. 공사개요

본 연구의 현장부설시험구간은 경기도 평택시 장당동 417-1 경부선 2복선 노반 신설 공사(4공구)구간 (서울 기점 70k700~70k850 구간)으로서 J건설(주)과 D컨설팅에서 시공 및 감리를 담당하고 있다 <그림 1 참조>. 현장은 현재 운행되고 있는 경부선(상행선)에 인접하여 신설되고 있으며, 부지 조성을 위한 노상의 경우 원지반 위에 양질의 토사를 이용하여 성토고 약 3m, 폭 10m로 조성되었으며, 그 단부는 약 1:1.5 구배의 비탈면을 두었다.

노상 조성 완료 후 재료별, 두께별 강화노반의 성능평가 및 현장 적용성 검증을 위해 노상 상부에 각 재료별로 두께를 달리하여 강화노반을 조성하여 3 종류의 서로 다른 계측기를 매설하였다.



<그림 1> 현장위치도



<사진 1> 현장 전경도

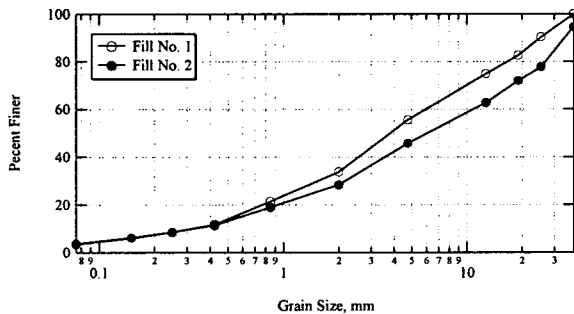
## 3. 현장부설시험

### 3.1 노반재료의 물리적 특성

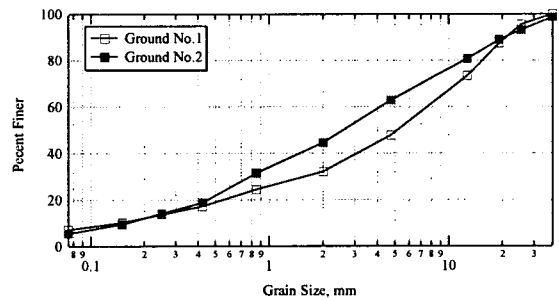
본 시험구간의 강화노반 재료 포설 이전에 원지반 및 노상(성토)시료의 물리적 특성 분석을 위하여 두 시료를 채취하였다. <표 1>은 원지반과 노상재료의 기본물성시험결과를 나타내었다. <표 1>에서와 같이 입도분포시험결과 200번체 통과량이 20%미만인 양질의 토사를 사용한 것을 알 수 있다.

<표 1> 원지반과 노상재료의 기본물성시험결과

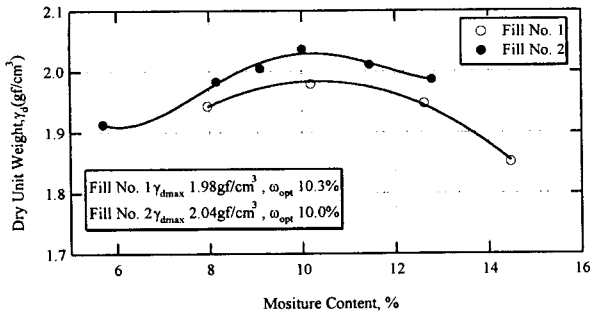
시료명		성토-1	성토-2	원지반-1	원지반-2
다짐시험	최적함수비, %	10.3	10.0	10.3	10.3
	최대건조단위중량, $tf/m^3$	1.98	2.04	1.98	1.98
입도시험	#4체 통과량, %	55.6	45.8	47.7	62.8
	#200체 통과량, %	3.5	3.8	7.2	5.5
관등계수( $C_u$ )		22.2	40.7	45.9	25.3
곡률계수( $C_g$ )		1.78	1.63	1.33	0.88



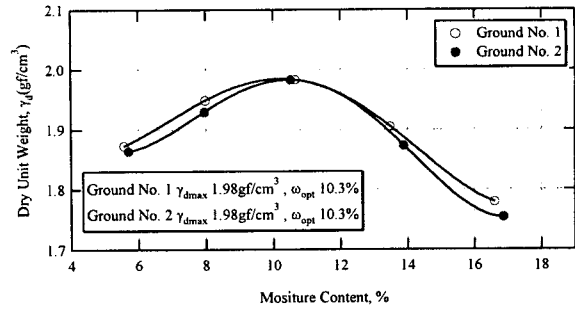
<그림 2> 노상(성토)시료의 입도시험결과



<그림 3> 원지반토의 입도시험결과



<그림 4> 노상(성토) 시료의 다짐시험 결과

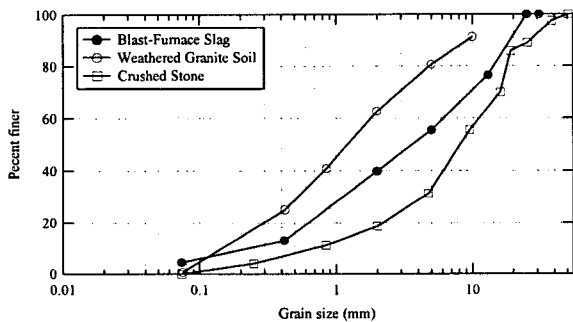


<그림 5> 원지반의 다짐시험결과

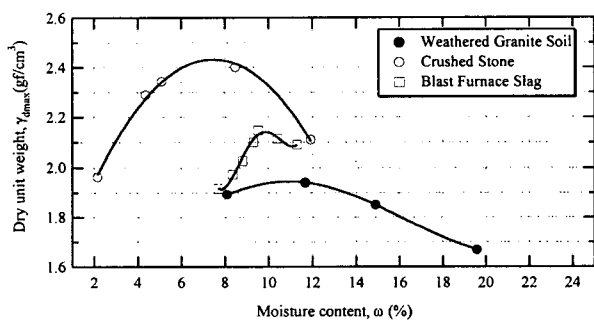
또한, 각 재료별 강화노반의 성능 평가를 위하여 본 현장시험에서는 수경성입도조정 고로슬래그(HMS-25), 쇄석, 양질의 토사 등 3종류의 강화노반재료를 채택하여 시공하였다. 시험에 사용된 HMS-25는 D개발(주)에서 생산되고 있는 것을 사용하였으며, 입도조정 쇄석(M-40)은 경기도 안성에 위치한 S개발(주) 채석장에서 채취한 것을 사용하였다. <표 2>는 HMS-25와 쇄석의 공학적 특성을 나타내었다. 쇄석의 암성분은 호상 편마암이 주를 이루고 있다.

<표 2> 강화노반재료의 기본물성치

슬래그		쇄석	
40번체 통과량	13.3%	겉보기비중	2.70
200번체 통과량	4.8%	흡수율	0.71%
-	-	일축압축강도	829kgf/cm <sup>2</sup>
-	-	마모율	24.1%
최대건조밀도(γ <sub>dmax</sub> )	2.15gf/cm <sup>3</sup>	최대건조밀도(γ <sub>dmax</sub> )	2.45gf/cm <sup>3</sup>
최적함수비(w <sub>opt</sub> )	9.55%	최적함수비(w <sub>opt</sub> )	7.45%



<그림 4> 현장 부설 재료의 입도분포곡선



<그림 5> 현장 부설 재료의 다짐곡선

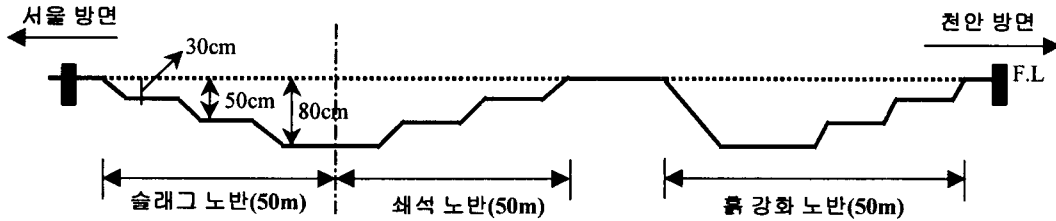
### 3.2 강화노반 단면 조성 방법

강화노반의 단면조성방법은 성토한 노상 위에 궤도 중심선 측량을 하여 레일이 놓일 위치를 선정한다. 다음 각 재료별로 15cm씩 고르게 포설하고 재료별로 함수비를 조절하여 살수(撒水)한 다음 진동롤러로써 다짐을 실시하였다.

각 층별 다짐관리는 재료별 최대건조밀도(γ<sub>dmax</sub>) 및 함수비를 기준으로 하였는데 현장 시공 다짐은

실내 시험에서 구한  $\gamma_{dmax}$ 의 95%를 기준으로 하여 다짐도 및 함수비를 조절하였다.

층별로 다짐이 완료되면 현장 들밀도 시험을 실시하여 다짐도를 측정하여 다짐도가  $0.95 \gamma_{dmax}$  기준에 부합하지 않으면 재 다짐을 하여 기준에 적합하도록 시공하였다. <그림 6>에는 조성된 강화노반의 횡단면도를 나타내었다.



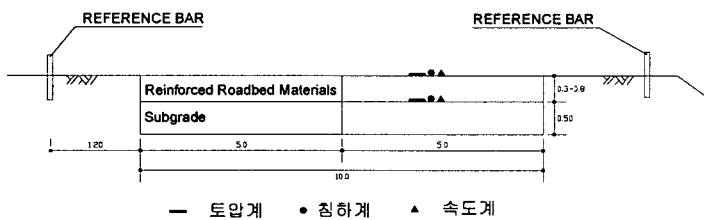
<그림 6> 강화노반 횡단면도

### 3.3 계측기 종류 및 매설 방법

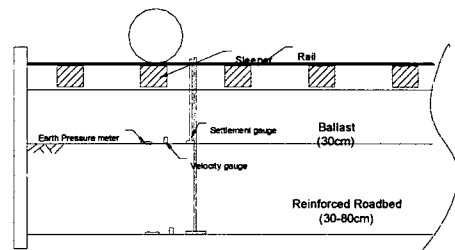
현장부설시험의 주목적인 강화노반의 현장 적용성 및 성능 평가를 위하여 노반 상부 및 강화노반 상부에 <표 3>에서와 같이 토압계, 속도계(Geophone), 침하계 등 3종의 계측기를 설치하였다. <그림 7>에는 매설된 계측기의 평면도를 나타내고 있으며, <그림 8>에는 계측기 매설 단면도를 각각 나타냈다.

<표 3> 매설된 계측기 수량

종 류	수 량	산출 근거	사용 목적
토압계	36개	4개/단면×9단면	열차운행 하중에 의한 토압측정 및 하중 분산 효과 측정
속도계	36개	4개/단면×9단면	열차운행 하중에 의한 노반진동 정도 및 동적 변위 측정
침하계	18개A	2개/단면×9단면	열차통과톤수에 따른 소성 침하량 측정



<그림 7> 계측기 매설 단면도



<그림 8> 계측기 매설 평면도

<그림 7>의 평면도에서 보면 토압계는 열차 주행시 레일 하부의 응력측정을 위해 양 레일의 연직 하부 노상 및 노반 상부에 각 2개씩 매설하였으며, 속도계는 토압계의 중심에서 25cm 떨어진 위치에 매설하였다. 침하계의 경우에는 구간 중심부 중 침목과 침목 사이에 설치하였다.

토압계와 속도계의 경우 <그림 8>에 나타낸 바와 같이 노상 상부 및 노반 상부에 단면별(총 9단면) 4개씩 총 36개를 매설하였고 침하계의 경우는 단면별 2개씩 총 18개를 매설하였다.

### 3.3.1 계측기 종류 및 사양

본 연구에서 사용된 토압계는 일본 NMB사의 GS-2F-1 Type의 제품과 TML사의 KD-2C Type의 제품으로 한계토압이  $2\text{kgf/cm}^2$ 의 토압계를 사용하였다. 토압계를 지중에 매설하게 되므로 지중으로 침투된 우수로부터 보호하기 위하여 현장에 매설 하기 전에 실내에서 PVC관을 사용하여 토압계에서 나온 Cable과 중간 연결 Cable 사이를 에폭시 수지와 에폭시 본드를 사용하여 방수처리를 실시하였다.

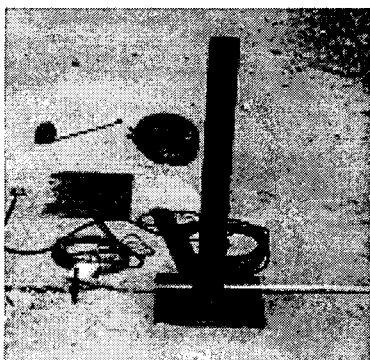
속도계는 초소형의 디지털방식의 이중코일-자석 구조로 이루어져 높은 출력성능을 가지고 있고 방수를 위해 sealing되어 있으며, 공진 주파수는  $4.5\text{Hz}$ 이고 주파수에 따라 일정한 출력전압을 발생시켜주는 진동 주파수는  $10\sim 100\text{Hz}$ 이다. 진동의 입자 속도에 대한 전기적 출력비를 나타내는 Sensitivity는  $358\text{mV/cm/s}$ 이다. 현장에 속도계를 매설하기 위하여 속도계를 토압계와 마찬가지로 에폭시 수지와 에폭시 본드를 사용하여 sealing을 했는데 이는 열차 주행시 작용하는 하중으로 인한 속도계의 파손방지 및 방수를 위함이다.

현장 부설 시험시에 노반의 침하량 측정을 위해 침하계를 설치하였다. 침하계는  $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ 로 제작된 침하판에 강봉을 설치하고 강봉 주위에는 PVC관을 설치하였다. 강봉 주위에 PVC관을 설치하는 것은 침하판의 지반내 매설 후 강봉과 연결된 침하판이 상부 하중으로 인하여 침하될 때 지반내의 흙으로 인해 강봉과 침하판이 침하하는데 영향을 받지 않도록 하기 위함이다.

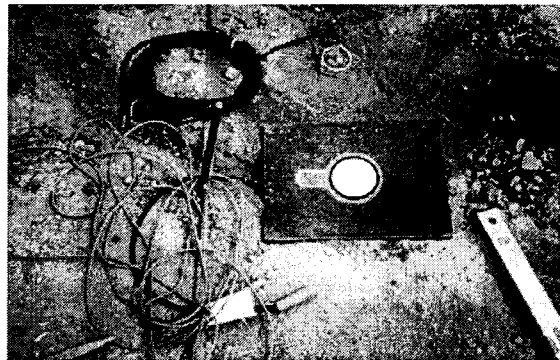
강봉은 상·하 두 부분으로 나뉘어져 나사로서 연결할 수 있도록 제작했는데 침하판과 연결된 하부 강봉 부분은 PVC관과 함께 지반내에 항상 매설되어 있고 상부 부분은 침하량 측정시에만 하부 부분과 연결하여 사용하도록 되어 있다.

노상 및 노반의 침하량 측정은 측량기의 일종인 Laser 변위 측정기(AMS-2000)를 이용하는데 이 장치의 원리는 측정기 본체에서 내장된 레이저 발생장치에서 레이저 수신장치(Target) 쪽으로 레이저빔을 발사하도록 되어 있다. 침하량 측정방법은 상부 강봉에 변위 측정기의 Target을 장착하고 이를 하부 강봉과 연결하여 열차 주행 후 레이저를 본체에서 발사하여 침하량을 측정하게 된다.

열차 통과 틈수에 따른 침하량 측정을 위해서는 노상 및 노반 침하량 초기값을 설정이 필요한데 이를 위하여 현장 시험 구간 부근에 기준점(부동점)을 선정하여 이 점을기준으로 열차 운행으로 인한 노반의 누적침하량을 측정한다.



<사진 2> 계측기 매설 장면



<사진 3> 현장 매설 계측기

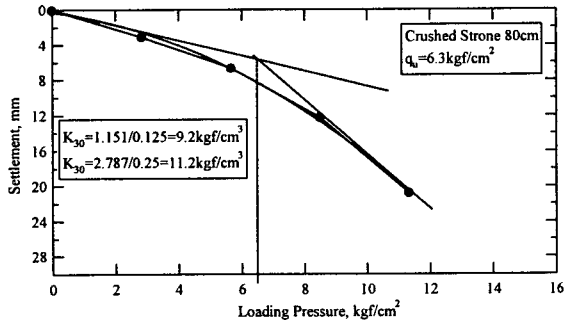
## 4. 평판재하시험 및 강성도 시험

### 4.1 평판재하 실험결과

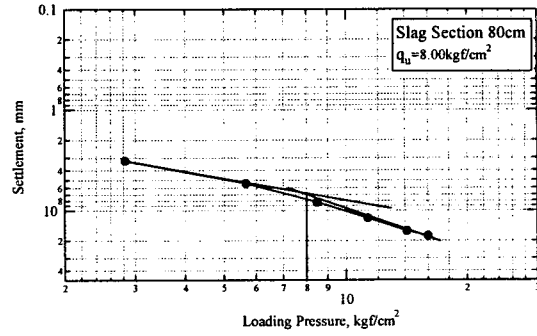
각 실험부지 강화노반 단면에 대한 노상의 평판재하실험결과는 <표 4>에 나타내었다. 실험 결과 <표 4>에서와 같이 모든 단면이 약  $10\sim 33\text{kgf/cm}^3$  정도의 지반반력계수 값을 나타내어 고속전철 노반 시방서에 의거한  $K_{30}\geq 7\text{kgf/cm}^3$ 의 노상 조건을 만족하였다. 시공시에 여러 가지 요인으로 인하여 실험부지

의 노상 조건을 일치하기는 어렵기 때문에 7kgf/cm<sup>3</sup>이상 다짐관리를 실시하였으며, 이와 같은 노상의 조건은 강화노반재료에 따른 성능평가에 많은 영향을 주지는 않을 것으로 판단된다.

<그림 9>는 슬래그 80cm 단면의 평판재하실험결과를 그림으로 나타내었다. 일반적으로 많이 사용되는 하중-침하곡선으로 지반반력계수와 극한지지력을 구하였으며, 하중-침하곡선으로 변곡점이 나타나지 않은 경우 <그림 10>와 같이 각 좌표를 log scale로 변환시켜 그 변곡점을 극한지지력으로 산정하였다.



<그림 9> 하중-침하곡선과의 관계



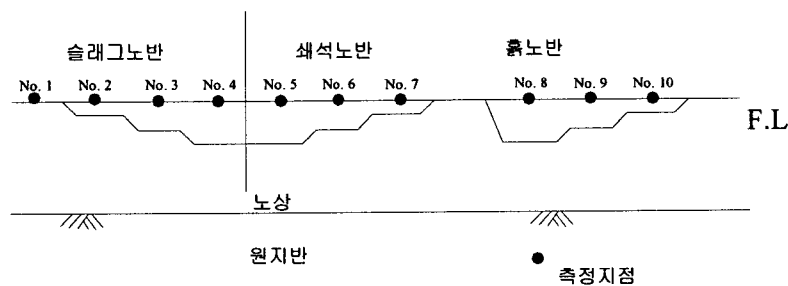
<그림 10> 하중-침하곡선과의 관계

<표 4> 평판재하실험결과

실험단면		노상 지반반력계수, K <sub>30</sub> (kgf/cm <sup>3</sup> )	극한지지력, q <sub>u</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	허용지지력, q <sub>a</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
쇄석단면	30cm	25.5	13.5	4.5
	50cm	33.4	14.2	4.7
	80cm	9.2	7.0	2.3
슬래그 단면	30cm	25.8	14.9	4.9
	50cm	14.6	8.2	2.7
	80cm	9.7	8.0	2.6
흙 단면	30cm	10.1	9.9	3.3
	50cm	11.2	7.9	2.6
	80cm	28.1	10.0	3.3

#### 4.1 지반강성도 실험결과

SASW 실험은 각 강화노반의 중심부에서 수행되었는데, 각 강화노반의 중심부에는 토압계, 속도계, 침하계 등과 같은 타 계측기가 설치되어 있었고, SASW 실험은 계측기가 설치된 곳에서 횡으로 약 1m 정도 떨어진 곳에서 수행되었다.



<그림 11> SASW 실험이 수행된 위치와 실험 측선 번호

SASW 실험으로 측정된 최소파장의 길이가 충분히 작지 않아서 0.3m, 0.5m 두께의 강화노반의 물성을 정확하게 추정하는 것은 용이하지 않았지만, 역산해석 결과 개략적인 경향은 파악할 수 있었다. 전

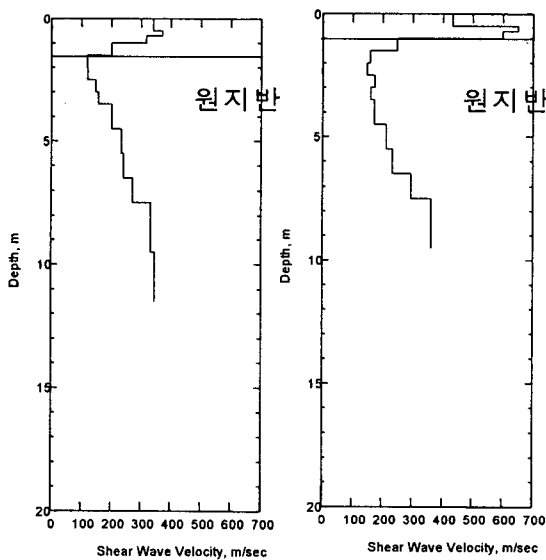
단파속도 주상도로부터 강화노반이라고 추정된 기준은 전단파속도가 200m/sec 이상의 크기를 보이고 하부에 100~200m/sec의 낮은 속도의 층이 이어질 때라고 하였다. 이러한 기준을 적용하여 보았을 때, 강화노반의 두께와 전단파 속도는 <표 5>에 정리한 바와 같이 정리될 수 있다.

<표 5> SASW 실험으로 측정된 강화노반의 두께와 전단파속도

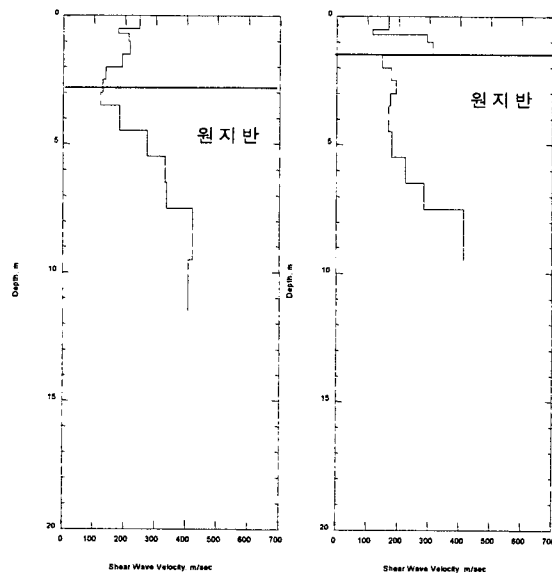
SASW 측선		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
강화노반 종류			슬래그 강화노반			쇄석 강화노반			흙 강화노반		
강화노반 두께 (m)	설계치	-	0.3	0.5	0.8	0.8	0.5	0.3	0.8	0.5	0.3
	측정치	-	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
강화노반 속도 (m/sec)	개별치	-	321	341	432	296	248	167	152	264	210
	평균치		365			237			209		

SASW 실험으로 추정된 각 강화노반의 두께는 0.5~1.0m의 분포를 보이고 있는데, 이는 역산해석시 첫 번째 두께와 두 번째 층후를 각각 0.5m로 설정하였기 때문에, 0.5m 또는 1.0m 이라는 해상도를 갖게 되었다. 만일, SASW 실험을 천층의 층상구조를 규명하는데 주력하는 방식으로 수행되었다면, 예를 들어 SASW 실험시 감지기간 거리를 0.1m, 0.2m, 0.4m, 0.8m로 하고, 또한 최소 5개소 이상의 측선을 설정, SASW 실험을 수행하여 평균치를 구했다라면 보다 정확하고 신뢰성있는 강화노반 두께의 추정이 가능하였으리라 사료된다.

한편, 각 강화노반의 전단파속도는 강화노반의 재료특성에 부합하는 결과를 보이고 있다. 슬래그 강화노반이 320~430 (평균: 365) m/sec, 쇄석강화노반이 170~300 (평균:237) m/sec, 흙강화노반이 150~260 (평균:209) m/sec의 전단파 속도를 나타내고 있는데, 평균속도를 기준으로 할 때, 슬래그 강화노반이 가장 강성이고, 다음으로 쇄석강화노반, 흙강화노반의 순으로 강성을 가지고 있다.



<그림 12> 슬래그 지반의 강성도



<그림 13> 쇄석 지반의 강성도

## 5. 결 론

철도 노반재로서 강화노반 시공은 국내에서는 처음으로 시행한 것으로 현장에서 계측 데이터를 얻기 위한 초기단계의 부지조성에 대한 평판재하시험결과와 SASW결과는 아래와 같다.

평판재하시험결과 지반반력계수는  $7\text{kgf/cm}^3$ 이상의 시방조건을 만족하였으며, 지반강성도시험결과 각 재료별 강성도의 크기는 슬래그, 쇄석, 흙 노반 순으로 조사되었다.

## 6. 맺 은 말

사용년수의 경과에 따라 노후화 또는 연약화되고 있는 철도노반의 기능 회복 또는 강화를 위해 적절한 강화노반 재료별, 두께별 성능을 평가함으로써 설계시의 기준자료로 활용할 수 있기 위해서는 국내에서는 처음으로 실시하게 되는 실현장 부설시험의 계측 결과는 무엇보다도 중요한 데이터가 될 것이다. 그러나 실현장에서의 데이터는 철도 부설시 발생할 수 있는 모든 현장 여건을 감안할 수는 없으므로 이와 병행하여 한국철도기술연구원에서는 실물크기 모형시험을 실시할 수 있는 종합 궤도·노반 시험장치를 도입하여 다양한 조건에 대한 시험을 실시할 계획이다.

본 고에서는 우선적으로 강화노반의 실현장 부설과정에 대한 사항을 기술하였으며, 앞서 언급한 바와 같이 실열차가 운행하게 되면 장기계측을 통해 강화노반의 성능평가를 실시하여 그 결과를 추후 지면을 통해 보고할 계획이다.

## 참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, “철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구(2차년도 연차보고서)”, 1999. 12.
2. Joh, S.-H., Advances in data interpretation technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) measurements., Ph. D. Dissertation, The university of Texas at Austin, 1996.
3. 須長誠, 關根悅夫, “鐵道強化路盤厚さの低減に関する研究”, 土木學會論文集 No. 498/VI-24, pp. 57~66, 1994. 9.
4. 關根悅夫, 村本勝巳, “營業線 路盤の支持力特性に関する研究”, RTRI REPORT, Vol. 9, No. 7, '95. 7, pp 19~24.
5. 須長誠, 關根悅夫, “經濟的な強化路盤の開発に関する研究”, RTRI REPORT Vol. 5, No. 10, '91. 10., PP 25~33.